

NASA-TM-75454
N78-3 2874

A Reproduced Copy
OF

A 78-24437

Reproduced for NASA
by the

NASA Scientific and Technical Information Facility

**REPRODUCIBLE COPY
(FACILITY CASEFILE COPY)**



c08-07

A78-24437 # Recent advances concerning an understanding of sound transmission through engine nozzles and jets (Neuere Erkenntnisse zum Schalldurchgang durch Triebwerksdüsen und Strahlen). D. Bechert, U. Michel, and E. Pfizenmaier (Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Institut für Turbulenzforschung, Berlin, West Germany). *Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, Jahrestagung, 10th, Berlin, West Germany, Sept. 13-15, 1977, Paper 77-048*, 21 p. 12 refs. In German.

Experiments on the interaction between a turbulent jet and pure tone sound coming from inside the jet nozzle are reported. This is a model representing the sound transmission from sound sources in jet engines through the nozzle and the jet flow into the far field. It is shown that pure tone sound at low frequencies is considerably attenuated by the jet flow, whereas it is conserved at higher frequencies. On the other hand, broadband jet noise can be amplified considerably by a pure tone excitation. Both effects seem not to be interdependent. Knowledge on how they are created and on relevant parameter dependences allow new considerations for the development of sound attenuators. (Author)

This Abstract Published in
INTERNATIONAL AEROSPACE ABSTRACTS

Issued by
TECHNICAL INFORMATION SERVICE
AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS, INC.
750 THIRD AVENUE, NEW YORK, N.Y. 10017

2-Jahrestagung
lin
13-15, 1977
2

048-1

DIETRICH BECHERT

ULF MICHEL

EBERHARD PFIZENMAIER +)

A78-24437

NEUERE ERKENNTNISSE ZUM SCHALLDURCHGANG DURCH
TRIEBWERKSDÜSEN UND-STRAHLEN

Jahrestagung 1977 der DGLR, Berlin, 13.-15.9.1977, Kongresshalle

Übersicht

Es wird über die Wechselwirkung zwischen einem turbulenten Freistrahle und einem Einzelton berichtet, der dem Strömungsfeld vor der Düse überlagert wird. Dies ist eine Modelluntersuchung für den Durchgang von Schall aus dem Inneren eines Flugtriebwerks durch Düse und Abgasstrahl ins Fernfeld. Es wird gezeigt, daß die Schall-Energie des Einzeltons bei tiefen Frequenzen durch die Freistrahlsströmung beträchtlich gedämpft wird (um mehr als 15 dB), bei höheren Frequenzen hingegen nahezu erhalten bleibt. Andererseits kann der breitbandige Strahlärm durch eine solche Einzeltonanregung auch beträchtlich verstärkt werden. Beide Effekte sind offenbar unabhängig voneinander. Kenntnisse über ihr Zustandekommen und über den Parameterbereich in dem sie auftreten, ermöglichen neue Überlegungen zum Aufbau von Schalldämpfern.

Abstract

Experiments on the interaction between a turbulent jet and pure tone sound coming from inside the jet nozzle are reported. This is a model representing the sound transmission from sound sources in jet engines through the nozzle and the jet flow into the far field. It is shown that pure tone sound at low frequencies is considerably attenuated by the jet flow, whereas it is conserved at higher frequencies. On the other hand, broadband jet noise can be amplified considerably by a pure tone excitation. Both effects seem not to be interdependent. Knowledge on how they are created and on relevant parameter dependences allow new considerations for the development of sound attenuators.

+) Dr.-Ing. Dietrich Bechert,
Dr.-Ing. Ulf Michel und
Dr.-Ing. Eberhard Pfizenmaier

Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Turbulenzforschung
Müller-Breslau-Str.8, 1 Berlin 12

DGLR 77-048

1. Einleitung.

Der Mechanismus der Schallausbreitung durch Düsen und Freistrahlen und die Frage, ob ein Abgasstrahl Schall aus dem Inneren eines Flugtriebwerks verstärken kann, ist von beträchtlichem Interesse für die Abschätzung der Schallabstrahlung aus triebwerksinternen Schallquellen. Die gleiche Art Schallausbreitung findet man auch bei den Austrittsöffnungen von Lüftungs- und Klimaanlage und bei Kolbenmotoren.

In diesem Zusammenhang wurden in letzter Zeit vor allem zwei Fragen gestellt, denen in der vorliegenden Arbeit nachgegangen wird:

- a) Kann ein Abgasstrahl Schall verstärken, der sich von triebwerkinternen Quellen durch die Düse ausbreitet?

Crow[1], sowie Gerend, Kumasaka und Roundhill[2] gingen dieser Frage nach und schlossen aus ihren Messungen, daß der stromauf vor der Düse erzeugte Schall vom Strahl verstärkt werden kann. Im Unterschied dazu fand Moore[3] in einem erst kürzlich durchgeführten Experiment keinen Anhalt für eine solche Verstärkung.

- b) Die zweite Frage ist:

Kann Schall aus triebwerksinternen Quellen vor der Düse das turbulente Strömungsfeld des Abgasstrahls und dessen akustische Abstrahlung ins Fernfeld verändern?

Wir haben bereits über die Verstärkung des breitbandigen Strahlärms durch eine Einzelton-Schallanregung berichtet [4,5]. Dieser Effekt wurde vor kurzem durch Messungen von Moore[3] bestätigt. Zusätzlich konnte Moore bei relativ hohen Frequenzen des anregenden internen Schallfeldes auch eine leichte Dämpfung des breitbandigen Strahlärms durch eine Einzeltonanregung feststellen.

Die Schallabstrahlung eines Freistrahls ins Fernfeld ändert sich sogar auch dann noch, wenn der Strahl nicht

nur mit ebenen Wellen, sondern mit höheren akustischen Moden angeregt wird; z.B. durch eine spiralförmig umlaufende akustische Welle, die der Situation in Strahltriebwerken mehr entspricht[5]. In diesem Zusammenhang ist dann auch die Frage zu stellen, wieviel von der akustischen Leistung des Einzeltons in die abgestrahlte akustische Leistung des breitbandigen Freistrahllärms umgesetzt wird. Dieser Frage sind wir gleichfalls nachgegangen.

In der hier vorgestellten experimentellen Untersuchung wurden Einzelheiten des Strömungsfelds des Freistrahls nicht betrachtet. Die Messungen sind beschränkt auf das akustische Gesamtverhalten des Systems., d.h. auf die akustischen Eingangs- und Ausgangsgrößen. Daher wurde nur die akustische Leistung stromauf vor dem Düsenaustrittsquerschnitt gemessen und außerdem die Richtcharakteristik des abgestrahlten Schallfeldes bestimmt, wobei dann in den Fernfeldmessungen sowohl der Einzelton als auch der Breitbandanteil enthalten sind. Außerdem wurde der Reflexionsfaktor der Düse gemessen und eine Energiebilanz der einzelnen Schallanteile im Rohr und im Fernfeld aufgestellt.

2. Versuchsanordnung und Meßtechnik.

Die Versuchsanordnung besteht aus einem zylindrischen Plexiglasrohr mit einer konischen Düse angeordnet in einem reflexionsarmen Raum (Bild 1). Das Plexiglasrohr ist an ein Luftversorgungssystem angeschlossen, das von einem Radialkompressor mit elektronischer Drehzahlregelung gespeist wird. Damit ist es möglich, einen Freistrahls bis zu einer Machzahl $M=0,7$ kontinuierlich zu erzeugen. Zwischen dem Radialkompressor und dem Plexiglasrohr ist ein Schalldämpfer eingebaut um den Kompressorlärm von der Meßstrecke fernzuhalten. Ferner durchläuft die zugeführte Luft vor dem Eintritt in die Meßstrecke einen reflexionsfreien Abschluß, durch den akustische Resonanzen im Rohrsystem unterdrückt werden. Zur Erzeugung des Schallfeldes sind vier Druckkammerlautsprecher mit einer Anschlußleistung von je 60 Watt mit dem Zuleitungsrohr verbunden.

2.1. Messungen innerhalb der Plexiglas-Rohrleitung.

Zur Bestimmung der durch die Düse hindurch übertragenen akustischen Leistung wurde der Anteil der stromabwärts laufenden und der reflektierten Schallwelle bestimmt. Zu diesem Zweck wurde ein verschiebbares Sondenmikrofon auf der Rohrachse angebracht (Bild 2), dessen Außendurchmesser 4 mm betrug. (Dieser geringe Durchmesser des Sondenrohrs war notwendig, um Störungen des internen Schallfeldes durch die Meßeinbauten zu verhindern.) Das Schallfeld wurde dann für verschiedene Anregungsfrequenzen ausgemessen. Dabei wurde als obere Grenze die Frequenz genommen, bei der die erste radiale Rohr-mode (0/1) auftritt. Die beiden ersten azimuthalen Moden im Rohr (1/0 und 2/0) wurden dadurch unterdrückt, daß die Lautsprecher sorgfältig einzeln in Phase und Amplitude justiert und aufeinander abgestimmt worden sind. Zudem kann man sagen, daß kleine Fehler bei der Unterdrückung dieser beiden Moden die Messungen nicht stark beeinflussen, weil sie keine Druckschwankungen auf der Achse hervorrufen, auf der das Mikrofon angebracht ist. Der Frequenzgang des Sondenmikrofons wurde bei jeder einzelnen der gemessenen Frequenzen eingeeicht, und um eine ausreichende Meßgenauigkeit zu erzielen, wurde das Gesamtsystem des beweglichen Sondenmikrofons sorgfältig untersucht. (Der Vergleich der akustischen Leistungsbilanzen im Rohr und im Fernfeld verlangt eine Gesamtgenauigkeit, die besser als ± 1 dB sein muß; weitere Einzelheiten darüber werden in [6] mitgeteilt).

2.2. Fernfeldmessungen.

Die Fernfeldmessungen wurden mit einem 1/2" Kondensatormikrofon im reflexionsarmen Raum durchgeführt. Das Mikrofon war in Höhe der Rohrachse auf einem vertikalen Trägerarm montiert, der auf einem Kreisbogen um den Mittelpunkt des Düsenendquerschnitts geschwenkt werden konnte. Das Mikrofon durchlief den Kreisbogen von beinahe 360° (außer einem kleinen Ausschnitt, der durch das zuführende Plexiglasrohr ausgespart ist) in 95 Sekunden. Die Fernfeldbedingung, daß Schalldruck und Schallschnelle in Phase sein sollen, wurde sorgfältig geprüft und danach die Entfernung des Fernfeldmikrofons vom Düsenendquerschnitt mit 75 Düsenradien ($=1.5\text{m}$) festgelegt (weitere Einzelheiten siehe [6]). Die Fernfeldmessungen wurden sowohl für den Einzelton- als auch für den Breitbandanteil des vom Freistrahls herrührenden Lärms durchgeführt. Dabei wurden zunächst die

Einzeltonkomponenten mit schmalbandigen Filtern (3,16 Hz Bandbreite) ausgefiltert und aufgenommen. Durch sorgfältige Kontrollen wurde gesichert, daß der Breitbandanteil dabei nicht die Messung des Einzeltonanteils beeinflusst. Andererseits wurden auch Messungen des abgestrahlten Breitbandlärms vorgenommen, solange die Einzeltonanregung eingeschaltet war. Um dabei den reinen Breitbandlärmenteil des Freistrahls zu isolieren, wurden drei Schmalbandfilter mit der Einstellung "Rejection" auf die jeweilige Einzeltonfrequenz justiert, um die Grundwelle und die 1. und 2. Harmonische im Meßergebnis zu unterdrücken. Die Meßwerte der noch höheren Harmonischen lagen weit genug unter dem Breitband-Beitrag, sodaß die Unterdrückung der ersten beiden Harmonischen bei dieser Messung ausreichte.

Alle Filterfunktionen und Justierungen wurden während der gesamten Versuchsdurchführung auf einem Schmalband-Echtzeitanalysator überwacht.

3. Deformation des Schallfeldes durch die Strahlströmung (lineare Messungen).

3.1. Anregungsamplitude und Linearität der Messungen.

Die Schallausbreitungsmessungen durch den Freistrahls wurden bei genügend niedrigen Schallpegeln vorgenommen, um nichtlineare Effekte im Freistrahls ausschließen zu können. Ein solcher nichtlinearer Effekt ist z.B. die Verstärkung von breitbandigem Strahlärm durch eine genügend starke Einzeltonanregung [4]. Es wurde daher bei allen Messungen in diesem Abschnitt darauf geachtet, daß der breitbandige Strahlärm um nicht mehr als 1 dB durch die Einzeltonanregung verstärkt wurde. Die Linearität des Systems wurde außerdem direkt durch Vergleich von Rohr- und Fernfeldschalldrücken bei verschiedenen Amplituden verifiziert.

3.2. Messung der Richtcharakteristik des Einzeltons.

Bei niedrigen Frequenzen⁺) und ohne Strömung breitet sich ein Schallfeld kugelförmig aus einer Düse heraus aus. Mit Strömung verändert sich die Richtcharakteristik der Schallausbreitung jedoch völlig. Bild 3 zeigt einen

⁺) Eine geeignete dimensionslose Frequenz ist das Verhältnis von Düsenradius R zu akustischer Wellenlänge λ . Wir verwenden hier die Größe $2\pi R/\lambda = kR$ (Helmholtz-Zahl).

Vergleich zwischen unseren Messungen (mit Strömung) und Messungen, die kürzlich von Pinker und Bryce[7] veröffentlicht wurden. Der Schalldruck im Fernfeld ist mit dem Schalldruck normalisiert, der senkrecht zur Strahlachse gemessen wurde. Die Übereinstimmung ist sehr gut.

Mit zunehmender Machzahl des Freistrahls wird die Schallabstrahlung mehr und mehr in der Richtung stromab konzentriert. Bei höheren Frequenzen wird bereits ohne Strömung ($M=0$) eine verstärkte Abstrahlung in der "Strömungs"-richtung auch auf der Strahlachse festgestellt. Die Strömung vergrößert diese Schallabstrahlung stromab noch, aber nicht so deutlich wie bei tiefen Frequenzen. Zusätzlich verursacht aber die Strömung einen tiefen Einbruch in einen schmalen Bereich der Richtcharakteristik, der das Gebiet auf der Strahlachse umfaßt.

In Bild 3 werden außerdem theoretisch berechnete Richtcharakteristiken von Munt[8] mit den gemessenen Werten verglichen. Das theoretische Modell von Munt basiert auf einer Konfiguration, die von einem halbumendlichen Rohr mit kreisförmigem Querschnitt ausgeht, das einen Freistrahls mit rechteckigem Geschwindigkeitsprofil erzeugt. Es werden dabei im Freistrahls stromab laufende Instabilitätswellen und eine volle Kutta'sche Abflußbedingung im Rohrquerschnitt angenommen. Das bedeutet, daß die Strömung das Rohrende tangential zur Rohrwand verläßt. Wir haben vor einiger Zeit auch das Problem der Abflußbedingung untersucht[9] und fanden dabei, daß dies eine vernünftige Annahme ist für den Strouhalzahlbereich, der hier in Betracht kommt.

Die gute Übereinstimmung der Munt'schen Theorie sowohl mit unseren als auch mit den Messungen von Pinker und Bryce ist sehr ermutigend. Es wird dadurch gezeigt, daß die idealisierte Annahme eines halbumendlichen Rohres in der Theorie noch mit Meßergebnissen zusammenpaßt, die an einer doch etwas anderen geometrischen Konfiguration gewonnen wurden.

3.3. Reflexionsfaktor der Düse.

In Bild 4 ist der Reflexionsfaktor r_p der Düse aufgetragen über der dimensionslosen Frequenz kR (= Helmholtz-Zahl). r_p ist definiert als das Verhältnis der Schalldruckamplitude der reflektierten Welle zur Schalldruckamplitude der stromab laufenden Welle im Rohr. Um r_p zu bestimmen, muß

die Schalldruckverteilung im zylindrischen Rohr vor der Düse (vgl. Bild 1) gemessen werden. Dabei wurde eine Korrekturfunktion $(1-M_T/1+M_T)$ benutzt, um den Einfluß der Strömung ($M < 0,1$) auf das Schallfeld zu berücksichtigen, wobei M_T die Machzahl der mittleren Strömung im Rohr ist (s. auch [10,11,12]).

Die Flächenverminderung in der konischen Düse vom zylindrischen Rohr bis zum Endquerschnitt wurde bei der Berechnung des Reflexionsfaktors nicht in Betracht gezogen. Dies scheint auch für die hier dargestellten Versuche bei relativ niedrigen Frequenzen zulässig zu sein, was durch einige Argumente unterstützt wird, auf die in [6] näher eingegangen wurde. Wir sind uns über die Grenzen einer solchen vereinfachenden Annahme im klaren. Eine strengere Berechnung des Schalldurchgangs durch eine Düse mit Strömung ist in einer späteren Veröffentlichung vorgesehen.

Die oberste gestrichelte Kurve in Bild 4 stellt den Reflexionsfaktor eines halbumendlichen Rohres bei $M=0$ nach der Rechnung von Levine und Schwinger [14] dar. Die Kreis-Symbole direkt unter dieser theoretischen Kurve zeigen drei Meßpunkte aus unseren Experimenten mit einem halbumendlichen Rohr in ruhender Luft. Die Messung mit einer konischen Düse als Abschluß des zylindrischen Rohrs und bei ruhender Luft zeigt die oberste durchgezogene Kurve (Kreuz-Symbole = Meßpunkte). Bei tieferen Frequenzen zeigt diese Kurve ein ganz ähnliches Verhalten wie beim halbumendlichen zylindrischen Rohr. Dies ist ein weiteres Argument für unsere Vereinfachung hinsichtlich r_p .

Die geringe Welligkeit der Kurve bei höheren Frequenzen entspricht geringen Reflexionen an den Durchdringungsflächen zwischen dem kegeligen und den beiden zylindrischen Teilen der Düse.

Mit zunehmender Machzahl nimmt auch diese Welligkeit zu. Es ist also anzunehmen, daß die Reflexionen an den Stellen, an denen die Düsenoberfläche von den zylindrischen Teilen auf den Kegel übergeht bei höheren Machzahlen wesentlich mehr Einfluß auf den gesamten Schalldurchgang haben.

Die hier dargestellten Messungen passen ziemlich gut mit früheren Messungen von Mechel, Schilz und Dietz [1] zusammen, die bei kleineren Geschwindigkeiten ($0 < M \leq 0,3$) vorgenommen wurden; dies obwohl die geometrischen

Bedingungen unterschiedlich waren, d.h. obwohl keine konische Düse mit scharfer Austrittskante sondern ein zylindrisches Rohr mit einer senkrechten Platte als Abschluß benutzt wurde, womit der Austritt des Strahls in einen halbbunendlichen Raum angenähert ist. Auch das Austrittsgeschwindigkeitsprofil bei Mechel, Schilz und Dietz ähnelte mehr einer vollentwickelten turbulenten Rohrströmung, als einem beinahe rechteckigen Geschwindigkeitsprofil am Düsenaustritt wie in unserem Fall.

Bei unseren Messungen interessiert das allgemeine Verhalten des Reflexionsfaktors bei zunehmender Machzahl. Bei zunehmender Machzahl und zunehmender Helmholtz-Zahl kR (= höhere Frequenzen) wird auch ein zunehmender Teil der im Inneren des Rohres vorhandenen Schallenergie durch die Düse ins Fernfeld abgestrahlt. Bei sehr kleinem kR ist die Reflexion der Welle am Düsenende gleichfalls beträchtlich reduziert. Das bedeutet, daß bei hohen subsonischen Machzahlen Reflexionen, die zu Resonanzen mit einer angeschlossenen Düse führen können, nur in einem Frequenzband ungefähr von $kR = 0,1 - 0,4$ möglich sind.

3.4. Dämpfung der Schallenergie eines Einzeltons durch einen Freistrah.

Es wurden Messungen der akustischen Energie des Einzeltons im luftführenden Rohr vor der Düse (Bild 2) und im Fernfeld miteinander verglichen. Die durch den Düsenendquerschnitt hindurchtretende Schallenergie W_T wurde berechnet und der Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit im Rohr (< 30 m/s) wurde eliminiert [10,11,12]:

$$(1) \quad W_T = \frac{A_T}{\rho_T a_T} \cdot \left[p_+^2 (1 + M_T)^2 - p_-^2 (1 - M_T)^2 \right]$$

In dieser Gleichung ist A_T der innere Querschnitt des Rohres, ρ_T die Dichte im Rohr, a_T die Schallgeschwindigkeit im Rohr, M_T die Machzahl der Strömung im Rohr ($M_T < 0,1$), p_+ und p_- die Druckamplituden der stromab und stromauf laufenden Welle.

Die abgestrahlte Schallenergie im Fernfeld W_F wurde bestimmt durch:

$$(2) \quad W_F = \frac{\pi r_m^2}{\rho_a a_a} \int_0^\pi p^2(\theta) |\sin \theta| d\theta$$

In den Gleichungen (1) und (2) wurde p als der gemessene Effektivwert des Schalldrucks eingesetzt. Der Index o in Gleichung (2) kennzeichnet die Werte der umgebenden ruhenden Luft, r_m ist der radiale Abstand des Fernfeldmikrofons vom Düsenendquerschnitt, $p(\theta)$ ist die örtliche Größe des Schalldrucks im Fernfeld und θ der Winkel zwischen der Mikrofonposition und der Strahlachse.

Die "Gewichts"funktion $|\sin\theta|$ unter dem Integral in Gleichung (2) veranlaßt, daß dem in der Nähe der Strahlachse gemessenen Schalldruck ein geringerer Beitrag zur abgestrahlten Schallenergie zugemessen wird, als den Werten, die senkrecht zur Strahlachse gemessen wurden.

In Bild 5 ist eine logarithmische Auftragung des Verhältnisses der abgestrahlten Schallenergie W_F im Fernfeld zur Schallenergie W_T die den Düsenendquerschnitt verläßt in Abhängigkeit von der dimensionslosen Frequenz kR dargestellt. Für $M=0$ ist gezeigt, daß die Schallenergie im gesamten System vom Düsenende bis zum Fernfeld erhalten bleibt.

Die Messungen mit Strömung zeigen eine zunehmende Absorption der Schallenergie des Einzeltons durch den turbulenten Freistrahlfeld bei tiefen Frequenzen. Aus theoretischen Überlegungen ergibt sich für das Verhältnis W_F/W_T der abgestrahlten Schallenergie zur Energie des Schalls, der durch das Düsenende hindurchtritt, ein asymptotischer Wert proportional zu $(kR)^2$ bei tiefen Frequenzen. Bei höheren Werten kR ist die Schallabsorption durch den Freistrahlfeld sehr klein.

Für Strahltriebwerke in Flugzeugen kann man diesen Schalldämpfungseffekt bei Frequenzen am unteren Ende des Hörbereichs erwarten, d.h. bei Frequenzen niedriger als 50 - 100 Hz.

4. Die Fernfeld - Schallenergie des Einzeltons und des breitbandigen Freistrahlfeld - Lärms in Abhängigkeit vom Anregungspegel (nichtlineare Messungen).

Es wurde bereits erwähnt, daß die in der Einführung gestellte 2. Frage: "kann Schall aus triebwerksinternen Quellen vor der Düse das turbulente Strömungsfeld des Abgasstrahls und dessen akustische Abstrahlung ins Fernfeld verändern" mit ja zu beantworten ist. In einigen früheren Arbeiten

[4,5] haben wir dazu Einzelheiten mitgeteilt, die sowohl die Verstärkung des Breitbandlärms durch Einzeltonanregung mit einer ebenen akustischen Welle als auch mit höheren akustischen Moden betreffen.

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt nun die erste Frage, ob der Abgasstrahl den anregenden Einzelton verstärken kann, mit nein beantwortet wurde, bleibt im Zusammenhang mit beiden Fragen ein weiteres Problem offen: läßt sich die Fähigkeit des Freistrahls, die Schallenergie des Einzeltons zu dämpfen damit erklären, daß die akustische Energie des Einzeltons im Fernfeld dann in andere Frequenzbänder umgesetzt wieder auftaucht, oder ist dies nicht der Fall?

Um diese Frage zu beantworten, wurden weitere Versuche mit ebenen Wellen und verschiedenen Anregungspegeln des Einzeltons durchgeführt. Der Anregungspegel wurde in dem Bereich variiert, in dem auch die breitbandige Strahl-lärmverstärkung durch den Einzelton erzeugt werden kann. Alle zur Gesamtschallenergie beitragenden Anteile wurden gemessen. Das sind: die durch den Düsenendquerschnitt hindurchtretende Schallenergie^{*)} W_T und die gesamte ins Fernfeld abgestrahlte akustische Energie (Einzelton + Breitbandanteil), ferner die Anteile der abgestrahlten Energie der Grundmode des Einzeltons und die Anteile der ersten und zweiten Harmonischen, außerdem der Anteil des reinen verstärkten Breitbandlärms (nachdem der Einzeltonanteil im Spektrum unterdrückt wurde). Alle diese Beiträge sind in Bild 6 in Abhängigkeit vom Anregungspegel aufgetragen.

Die Anteile der akustischen Energie wurden dabei dimensionslos gemacht mit der gleichfalls gemessenen akustischen Energie (Breitbandlärm) des

*) W_T ist definiert wie zuvor, d.h. als die Differenz zwischen der Energie der stromab laufenden Welle im Rohr und der am Düsenende stromauf reflektierten Welle, beide gefiltert bei der Grundfrequenz des Einzeltons. Höhere Harmonische werden durch nichtlineare Schwingungen der Lautsprechermembrane gleichfalls erzeugt. Ihr Anteil wurde jedoch im Rohr nicht gemessen. Man kann annehmen, daß die Schallenergie der höheren Harmonischen im Fernfeld und Rohr etwa gleich ist (nach Bild 5 tritt Energieerhaltung der Schallwelle bei höheren Frequenzen auf). Dann läßt sich der zusätzliche Beitrag dieser Anteile zu W_T aus der Fernfeldmessung bestimmen. Man findet, daß die von der Düse abgegebene Schallenergie W_T dadurch jedoch nur unwesentlich vergrößert wird.

nicht angeregten Freistrahls W_{jet_0} . Als Referenzgröße für den Anregungspegel wurde die relative Geschwindigkeitsschwankung $\tilde{u}/\bar{u}$ benützt. $\tilde{u}$ ist der Effektivwert der Geschwindigkeitsschwankung im Düsenendquerschnitt auf der Strahlachse und wurde mit einer Hitzdrahtsonde gemessen, $\bar{u}$ ist die mittlere Geschwindigkeit an derselben Stelle.

In Bild 6 wurde nun die Quadratwurzel der dimensionslosen Schallenergie $(W/W_{\text{jet}_0})^{1/2}$ aufgetragen über der relativen Geschwindigkeitsschwankung im Düsenendquerschnitt $\tilde{u}/\bar{u}$.

Es werden zwei Experimente mit typischen Parameterkombinationen beschrieben:

- a) Eine Messung mit der Parameterkombination $M=0,6$ und $kR=0,873$, die auf der linken Seite von Bild 6 zu sehen ist.

Bei dieser Kombination von Machzahl und Helmholtz-Zahl kann durch den Einzelton die breitbandige Strahlärmverstärkung leicht hervorgerufen werden, weil der Freistrahler hier seine größte Empfindlichkeit gegen von außen aufgeprägte Störungen besitzt. Andererseits erwartet man nach Bild 5 fast keine Dämpfung der Schallenergie des Einzeltons durch den Strahl in diesem Bereich.

Die oberste Kurve zeigt dann die Grundmode der durch den Düsenendquerschnitt hindurchtretenden Schall-Leistung W_T .

Da nun die gesamte abgestrahlte Energie (die nächst-tiefergelegene Kurve), die als die Summe der abgestrahlten Grundmode des Einzeltons, ihrer Harmonischen und des abgestrahlten (durch den Einzelton verstärkten) breitbandigen Strahlärms zu verstehen ist, im gesamten Bereich der Anregungspegel kleiner ist als die Schallenergie W_T , folgt, daß offenbar selbst bei dieser Parameterkombination der Einzelton gedämpft wird. Dies wird nur teilweise kompensiert durch den hier hinzutretenden Anteil des verstärkten Breitbandärms.

- b) Noch eindeutiger werden die Ergebnisse der Untersuchung

rechten Seite von Bild 6 zu sehen ist.

In diesem Fall ist sowohl die Breitbandstrahlärmverstärkung in unserer Versuchsanordnung auch bei hohen Anregungspegeln kaum zu erzeugen ($< 1 \text{ dB}$) und gleichzeitig tritt nach Bild 5 eine hohe Dämpfung der Schallenergie des Einzeltons durch den turbulenten Freistrahle auf.

Aus den auf dieser Seite aufgetragenen Größen geht klar hervor, daß die Dämpfung der Schallenergie des Einzeltons bei allen Anregungspegeln sehr stark ist, da man nur einen sehr geringen Anteil der durch die Düse hindurchtretenden Schallenergie W_T im Fernfeld überhaupt wiederfindet. Ebenso ist die Verstärkung des Breitbandanteils durch den Einzelton sehr schwach und kann die Dämpfung der Einzeltonenergie bei weitem nicht kompensieren.

Sowohl die durch die Düse hindurchtretende Energie W_T als auch die Grundmode der ins Fernfeld abgestrahlten Schallenergie verlaufen bis zum höchsten Anregungspegel auf Geraden. Das bedeutet: Die Dämpfung der Schallenergie des Einzeltons durch einen turbulenten Freistrahle bei niedrigen Frequenzen ist im wesentlichen ein linearer Vorgang.

Daraus kann außerdem geschlossen werden: Die Dämpfung der Schallenergie des Einzeltons wird nicht verursacht durch eine Umverteilung akustischer Energie in andere Frequenzbänder.

Offensichtlich wirkt der Freistrahle wie ein richtiger Schalldämpfer und dies bei niedrigen Frequenzen.

Außerdem zeigt sich, daß der Strahlärmverstärkungseffekt und die Fähigkeit des Strahls die Schallenergie des Einzeltons zu dämpfen unabhängig voneinander sind.

5. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Ein turbulenter, subsonischer ($0 < M < 0,7$), kalter Freistrahle wurde durch einen Einzelton in Form einer ebenen akustischen Welle stromauf vor der Düse akustisch angeregt. Es wurde (a) die Richtcharakteristik, (b) der Düsenreflexionsfaktor, (c) die Ausbreitung der Schallenergie durch die Düse ins Fernfeld und (d) die nichtlineare Wechselwirkung zwischen dem anregenden Einzelton und dem Freistrahle untersucht. Dabei sind einige überraschende Ergebnisse festzuhalten:

- a) Die Fernfeld-Richtcharakteristik des Einzeltons wird durch die Strömung sehr stark deformiert, wobei sich die Abstrahlung in der Richtung stromab verstärkt, auf der Strahlachse aber besonders bei höheren Frequenzen ein tiefer Einbruch entsteht.

Da die Richtcharakteristik eines unbeeinflussten Freistrahls denselben Verlauf zeigt, dürfte es schwierig sein, den Strahlärm vom "core noise" derselben spektralen Verteilung (der stromauf vor der Düse erzeugt wird) zu unterscheiden.

- b) Es ergibt sich eine sehr starke Änderung des akustischen Reflexionsfaktors der Düse bei hohen subsonischen Machzahlen im Vergleich zum Fall $M=0$. Bei hohen Frequenzen wird die Reflexion akustischer Wellen entgegen der Strömungsrichtung vermindert, bei zunehmender Abstrahlung von Schallenergie durch die Düse.

Bei tiefen Frequenzen findet man gleichfalls eine Verminderung der Reflexion. Diese bei tiefen Frequenzen verminderte Reflexion wird konvektiven Einflüssen bei kleinen Strouhalzahlen zugeschrieben und wird nicht mit einer erhöhten Abstrahlung durch die Düse kompensiert.

Trotzdem besteht auch bei hohen subsonischen Machzahlen ein begrenzter Frequenzbereich mit starker Reflexion. Dies ist im Zusammenhang mit möglichen Resonanzeffekten in Düsen-Triebwerksanordnungen von Interesse. Man kann ferner

sagen, daß die Düsengeometrie durch diese "Filterwirkung" wahrscheinlich für das abgestrahlte Spektrum des "core noise" bestimmend ist.

- c) Die Dämpfung von Schallenergie bei niedrigen Frequenzen ist eine Eigenschaft des turbulenten Freistrahls, nach der man im Bereich der Schalldämpfer-Technologie bisher gesucht hat, d.h. eine Fähigkeit im Bereich tiefer Frequenzen breitbandig Schall zu dämpfen, mit zunehmender Dämpfung bei abnehmender Frequenz.
- d) Bei höheren Anregungspegeln des Einzeltons wurden im Fernfeld sowohl der abgestrahlte Einzeltonanteil als auch der Anteil des dadurch verstärkten Breitbandstrahlärms gemessen. Es wurde gezeigt, daß bei solchen tiefen Frequenzen, bei denen der Freistrahls als Dämpfer der Energie des Einzeltons wirkt, die breitbandige Strahlärmverstärkung nur einen vernachlässigbaren Anteil zu der gesamten abgestrahlten akustischen Energie beiträgt.

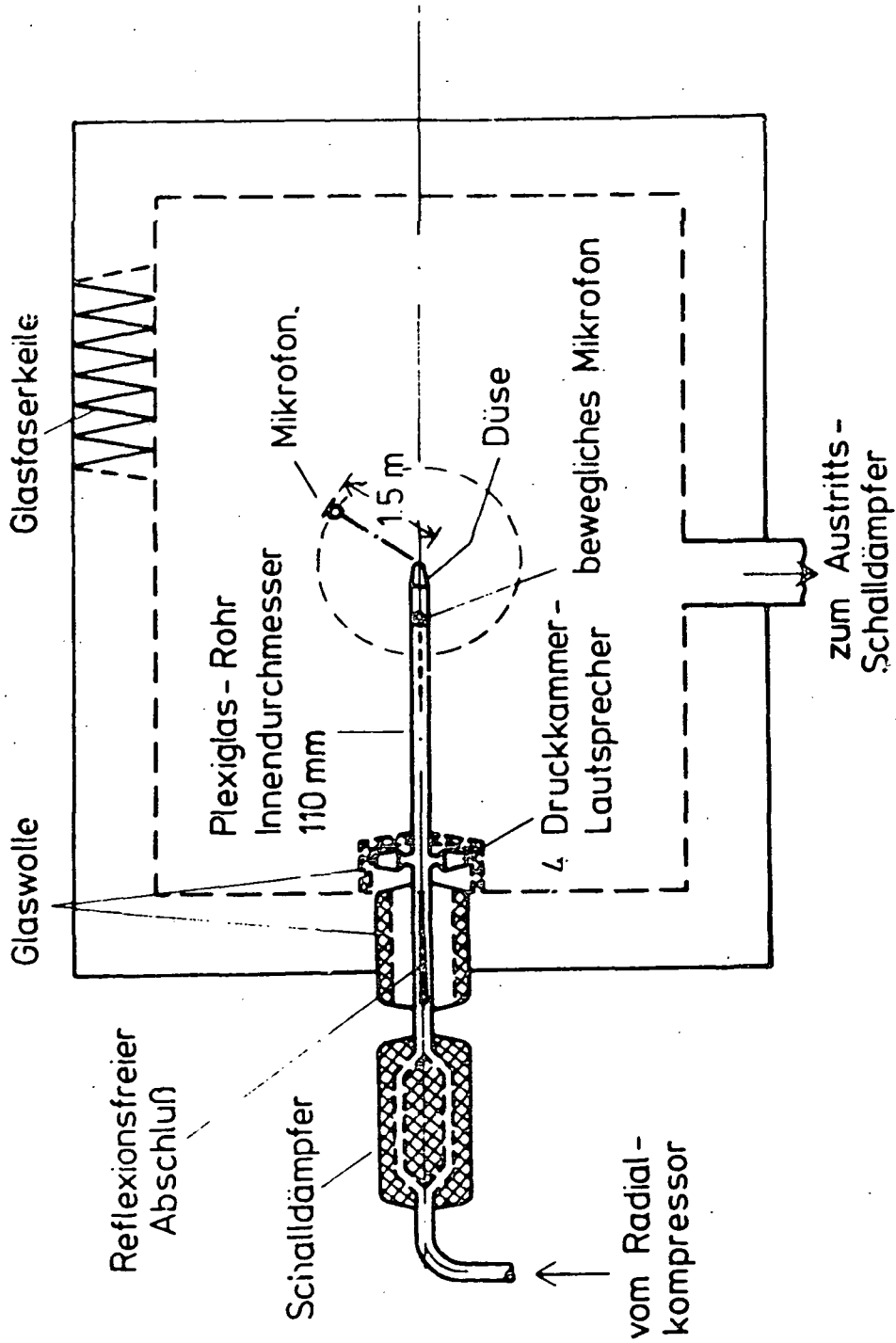
Daher kommt die beobachtete Dämpfung der Schallenergie des Einzeltons bei tiefen Frequenzen nicht durch eine Umverteilung des Einzeltonanteils in den Breitbandanteil zustande.

Trotz der Tatsache, daß die Strahlärmverstärkung als ein im wesentlichen nichtlinearer Prozess betrachtet werden muß, verhalten sich die Vorgänge des Schalldurchgangs durch die Düse und der Dämpfung der Schallenergie des Einzeltons noch linear, selbst bei solchen Anregungspegeln, bei denen die breitbandige Strahlärmverstärkung auftritt. Strahlärmverstärkung und Schalldämpfungseffekt sind also nicht voneinander abhängig.

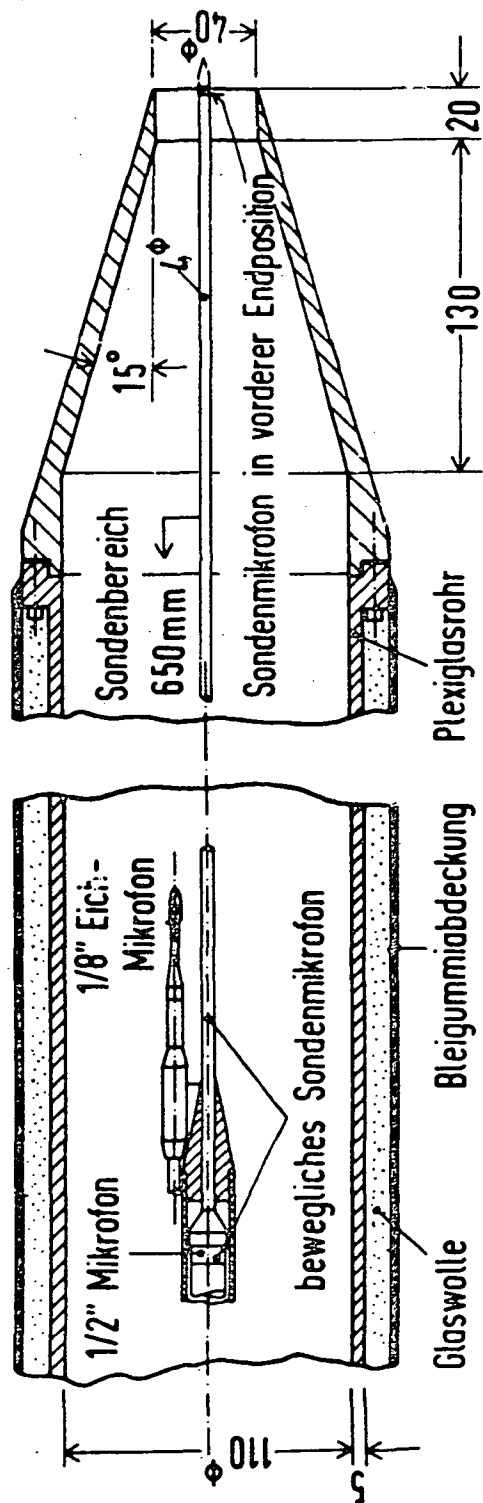
6. Schrifttum

- [1.] Crow, S.C.: The predictability of jet noise. Lecture at NASA Langley Research Center, Nov 1971, RFP-6-8442-SC-158 (Jan 1972).
S. auch: Acoustic gain of a turbulent jet. Meeting Am.Phys.Soc., Div. Fluid Dynamics, Univ.Colorado 1972, paper IEG.
- [2.] Gerend, R.P., Kumasaka, H.P., Roundhill, J.P.: Core engine noise. 1st AIAA Aeroacoustics Conference, 15-17 Oct 1973. AIAA Paper No. 73-1021.
- [3.] Moore, C.J.: The role of shear-layer instability waves in jet exhaust noise. J.Fluid Mech. 80 (1977) 321-367.
- [4.] Bechert, D., Pfizenmaier, E.: Die Verstärkung von Strahlärm durch Schall aus dem Triebwerk. Jahrbuch 1976 der DGLR, 76-162/1-27.
- [5.] Bechert, D., Pfizenmaier, E.: Amplification of jet noise by a higher-mode acoustical excitation. AIAA Journal (Sept. 1977)
- [6.] Bechert, D., Michel, U., Pfizenmaier, E.: Experiments on the transmission of sound through jets. 4th AIAA Aeroacoustics Conference, 3-5 Oct 1977. AIAA Paper No.77-1278.
- [7.] Pinker, R.A., Bryce, W.D.: Measurements of plane wave noise radiating from a jet nozzle. AIAA Journal 15 (1977) 133-134.
- [8.] Munt, R.M.: The interaction of sound with a subsonic jet issuing from a semi-infinite cylindrical pipe. Report, Dept. of Mathematics, Univ. of Dundee, Scotland (1976).
- [9.] Bechert, D., Pfizenmaier, E.: Optical compensation measurements on the unsteady exit condition at a nozzle discharge edge. J.Fluid Mech. 71 (1975) 123-145.
- [10.] Blokhintsev, D.I.: Akustika Neodnorodnoi Dvizhushcheysya Sredi. Leningrad (1946). Übers.: Acoustics of a nonhomogeneous moving medium. NACA TM 1399.
- [11.] Mechel, F., Schilz, W., Dietz, J.: Akustische Impedanz einer luftdurchströmten Öffnung. Acustica 15 (1965), 199-206.
- [12.] Candel, S.M.: Acoustic conservation principles and an application to plane and modal propagation in nozzles and diffusers. J.Sound Vib. 41 (1975) 207-232.

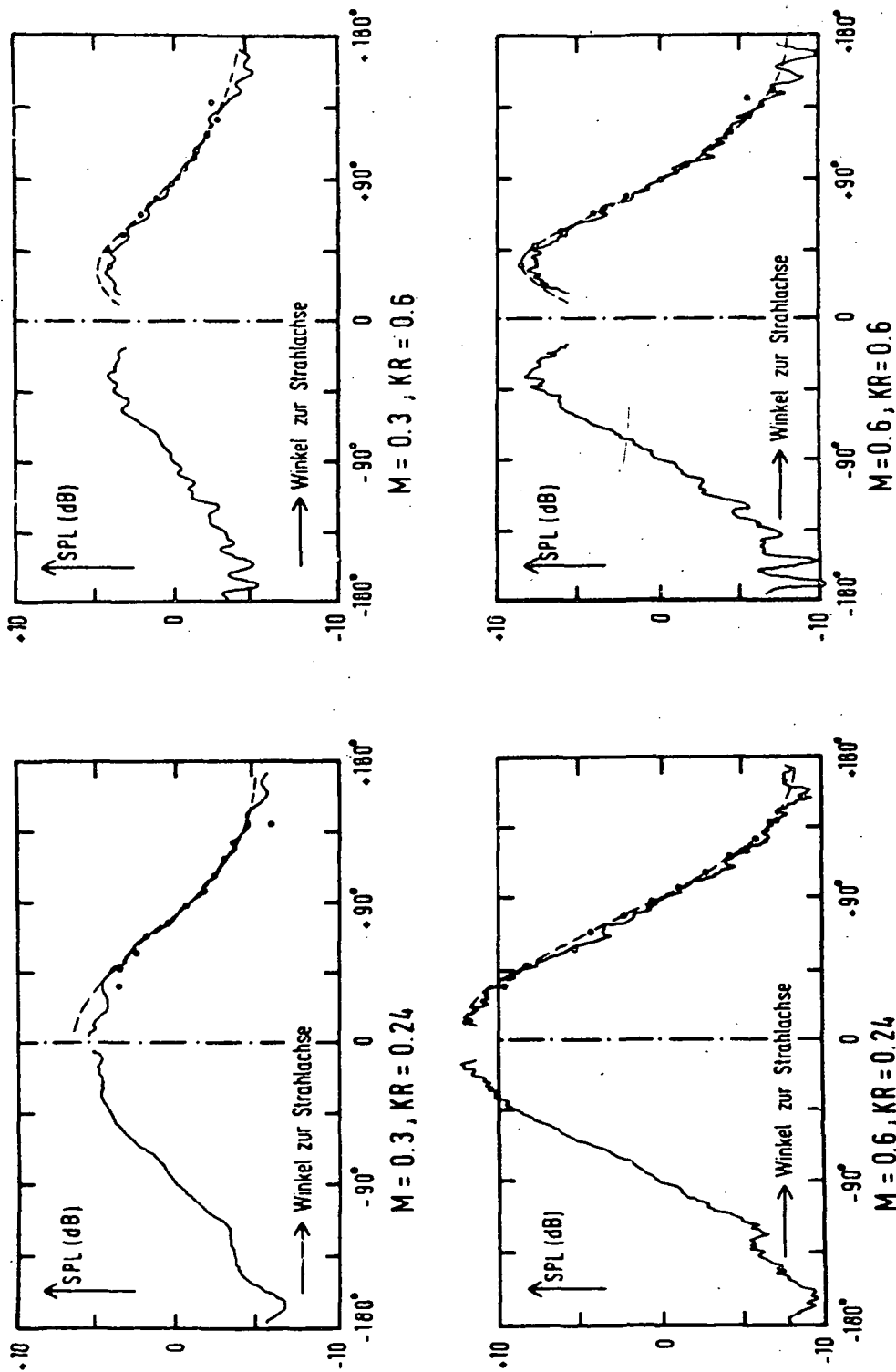
7. Bilder und Diagramme



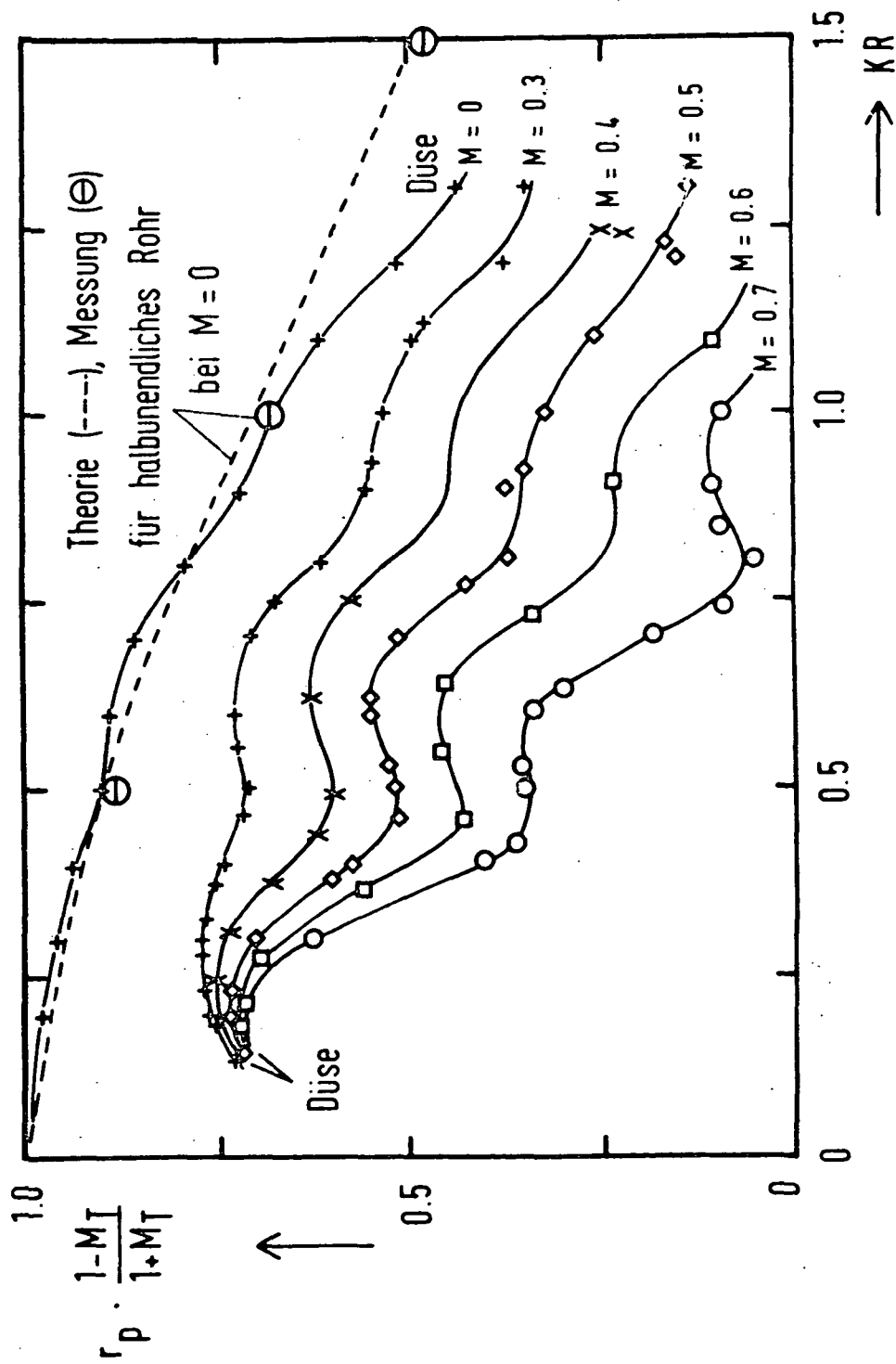
1.1: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung.



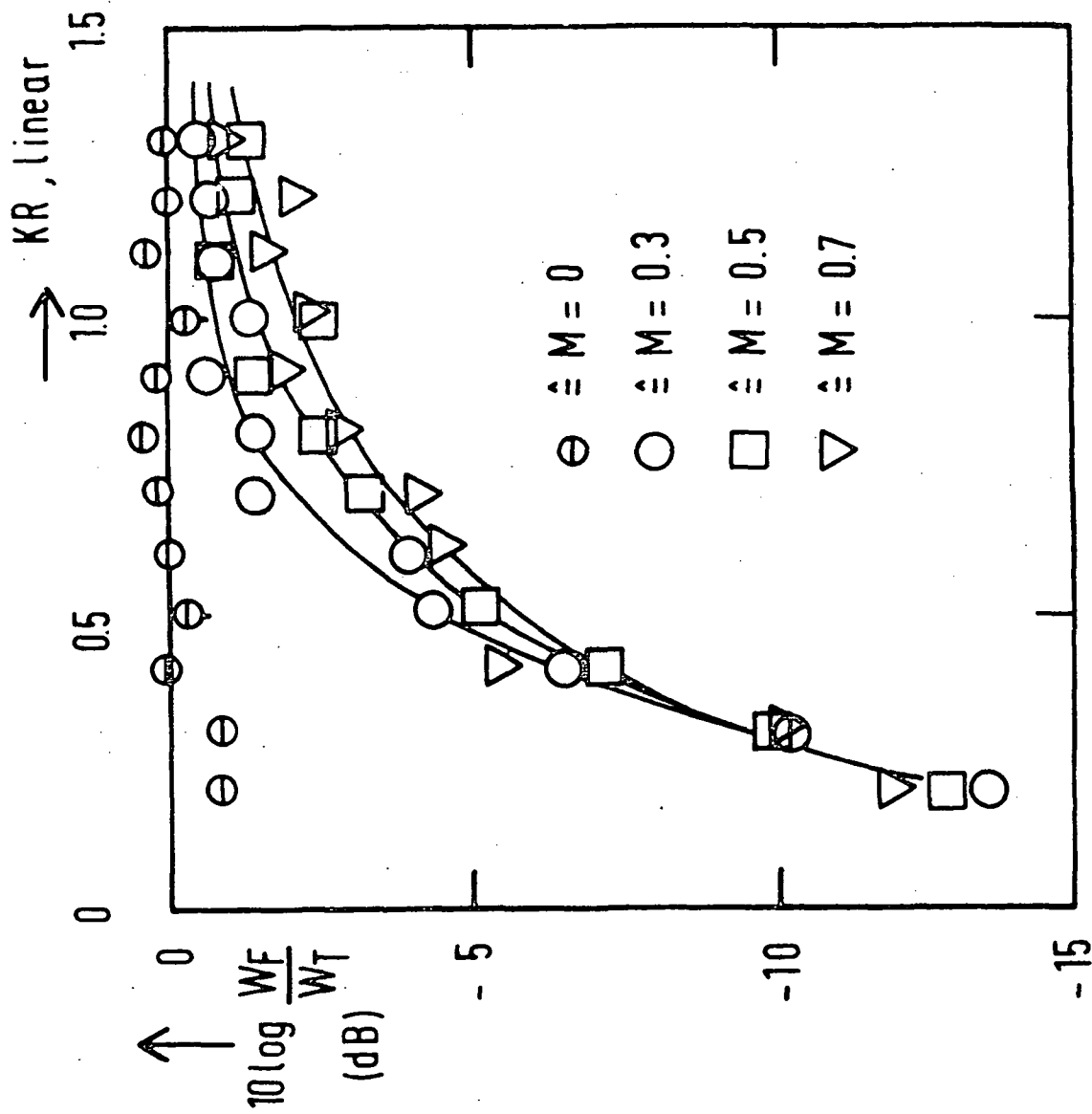
1 2: Konische Düse mit zylindrischem Zuführungsrohr und beweglichem Sondenmikrofon



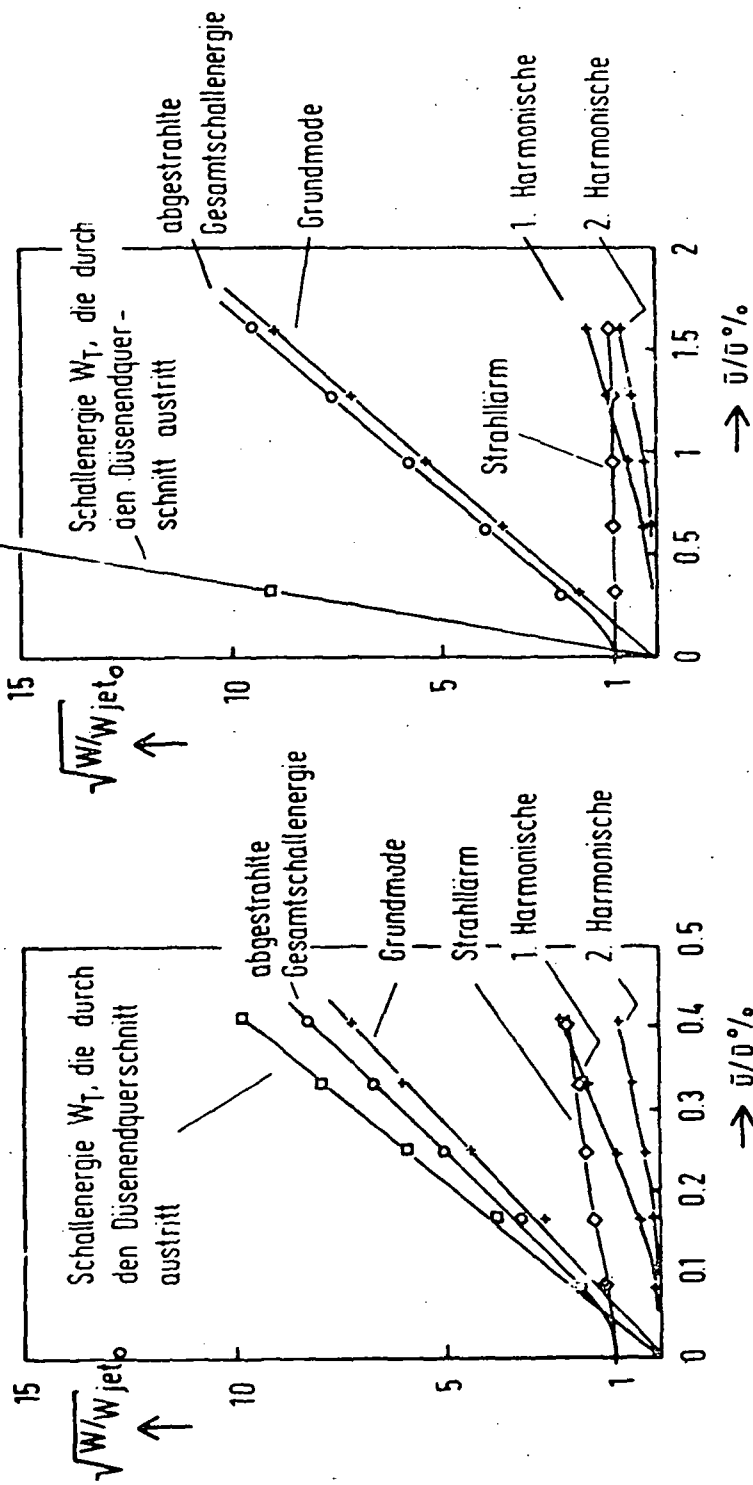
3: Fernfeld-Richtcharakteristik (durchgezogene Kurven) im Vergleich zu Theoretischen Ergebnissen von Munt [8] (gestrichelte Kurven) und zu neueren Messungen von Pinker und Bryce [7].



Id 4: Düsen-Reflexionsfaktor r_p in Abhängigkeit von der dimensionslosen Frequenz KR bei verschiedenen Machzahlen M .



1: Verhältnis der abgestrahlten Schallenergie im Fernfeld W_F zur Schallenergie W_T , die durch den Düsenendquerschnitt austritt, in Abhängigkeit von der dimensionslosen Frequenz KR bei verschiedenen Machzahlen M .



$$M = 0.6, \quad KR = 0.873, \quad S_0 = 0.463$$

$$M = 0.3, \quad KR = 0.2, \quad S_0 = 0.21$$

- 16: Schallenergie W (bezogen auf die Schallenergie des nicht angeregten Freistrahls W_{jet0}) in Abhängigkeit von der relativen Geschwindigkeitsschwankung im Düsenendquerschnitt $\bar{u}/\bar{u}_0$. Bei der Schallenergie W_m im Rohr wurde nur die Grundmode des Einzeltons gemessen. Für die abgestrahlte Schallenergie werden alle Einzelanteile, die einen wesentlichen Beitrag zur Gesamt-schallenergie im Fernfeld liefern angegeben.

END

DATE
FILMED

APR 2
1978